

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTORAT D'UNIVERSITÉ

PAR

BENARIE Michel

1^{re} THÈSE. — « Détermination de la limite inférieure
de comptage dans une granulométrie
microscopique. »

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.
« Résistance d'un milieu gazeux au mou-
vement de particules d'aérosols. »

11 JUIN 1965 00

Soutenues le _____ devant la Commission d'examen.

MM. ARNULF	Président.
BRICARD	} Examinateurs.
LE GRAND	

Extrait de la Revue d'Optique théorique et instrumentale

3 et 5, boulevard Pasteur — 165, rue de Sèvres

PARIS (15^e)

1966

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

Nom du Candidat : BENARIE

Prénom : Michel

Date de la soutenance :

Numéro d'ordre : Série A, 1139, N° 1163

1

BENARIE (Michel). — Détermination de la limite inférieure de comptage dans une granulométrie microscopique. — *Paris*, Extrait de la Revue d'Optique, 1966, 26 p., 16 fig.

Th. Doctorat d'Université, Paris, 1966, Série A, 1139, N° 1163.

2

BENARIE (Michel). — Détermination de la limite inférieure de comptage dans une granulométrie microscopique. — *Paris*, Extrait de la Revue d'Optique, 1966, 26 p., 16 fig.

Th. Doctorat d'Université, Paris, 1966, Série A, 1139, N° 1163.

3

BENARIE (Michel). — Détermination de la limite inférieure de comptage dans une granulométrie microscopique. — *Paris*, Extrait de la Revue d'Optique, 1966, 26 p., 16 fig.

Th. Doctorat d'Université, Paris, 1966, Série A, 1139, N° 1163.

4

BENARIE (Michel). — Détermination de la limite inférieure de comptage dans une granulométrie microscopique. — *Paris*, Extrait de la Revue d'Optique, 1966, 26 p., 16 fig.

Th. Doctorat d'Université, Paris, 1966, Série A, 1139, N° 1163.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTORAT D'UNIVERSITÉ

PAR

BENARIE Michel

1^{re} THÈSE. — « Détermination de la limite inférieure
de comptage dans une granulométrie
microscopique. »

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.
« Résistance d'un milieu gazeux au mou-
vement de particules d'aérosols. »

Soutenues le

devant la Commission d'examen.

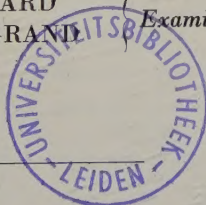
MM. ARNULF

Président.

BRICARD

LE GRAND

Examineurs.



Extrait de la Revue d'Optique théorique et instrumentale

3 et 5, boulevard Pasteur — 165, rue de Sèvres

PARIS (15^e)

1966

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PROFESSEURS

Doyen..... M. ZAMANSKY.

BRELOT	T	Analyse supérieure.	FORTET	T	Calcul des Probabilités et Phys. mathématique.
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparée.	SCHWARTZ	T	Calcul diff. et Intégral.
GRASSÉ	T	Evolution des êtres organisés.	CHOUARD	T	Physiologie Végétale.
PRÉVOST	T	Chimie organique.	MALAVARD	T	Aviation (Techn. Aéronaut.).
WYART	T	Minéralogie et Cristallogr.	NORMANT	T	Synthèse organique.
TEISSIER	T	Zoologie.	BÉNARD	T	Chimie Minérale.
MANGENOT	T	Biologie Vég. (Orsay).	BUVAT	T	Botanique (E. N. S.).
AUGER	T	Physique Quantique et Relativité.	DUGUÉ	T	Statistiques Mathématiques.
MONNIER	T	Physiologie Générale.	SOULAIRAC	T	Psychophysiologie.
PIVETEAU	T	Paléontologie.	ULRICH	T	Physiologie Végétale appliquée.
ROCARD	T	Physique (E. N. S.).	MARÉCHAL	T	Optique théorique et appliquée.
CARTAN	T	Mathématiques (E. N. S.).	KIRRMANN	T	Théories Chimiques.
LAFFITTE	T	Chimie générale.	CHADEFAUD	T	Botanique.
N.....	T	Géométrie supérieure.	M ^{lle} LE BRETON	T	Physiologie de la nutrit.
COULOMB	T	Physique du Globe.	LELONG	T	Application de l'analyse à la géométrie.
M ^{lle} COUSIN	T	Biologie Anim. (S.P.C.N.).	DEVILLERS	T	Anatomie et Histologie comparée.
CHRÉTIEN	T	Chimie minérale.	EHRESMANN	T	Topologie Algébrique.
BOCQUET	T	Zoologie.	FRANÇON	T	Physique (S. P. C. N.).
KASTLER	T	Physique (E. N. S.).	GLANGEAUD	T	Géographie physique et Géologie.
ÉPHRUSSI	T	Génétique.	DODEMENT	T	Mathématiques (M.G.P.).
RIVIÈRE	T	Géologie (S. P. C. N.) et sédim. (Orsay).	PISOT	T	Tech. Mathém. de la Phys.
GAUTHERET	T	Biologie Vég. (P. C. B.).	ROCH	T	Géologie.
LUCAS R.	T	Recherches Physiques.	SCHATZMANN	T	Astrophysique.
THOMAS A.	T	Biologie cellulaire.	TERMIER	T	Géologie générale.
ARNULF	T	Optique appliquée.	ZAMANSKY	T	Mathématiques générales.
MORAND	T	Physique Enseignement.	LENNUIER	T	Physique (M. G. P.).
SOLEILLET	T	Physique (P. C. B.).	RIZET	T	Génétique (Orsay).
FORTIER	T	Mécanique exp. des Fluides.	ROUTHIER	T	Géologie appliquée.
DRACH	T	Zoologie.	M ^{me} TONNELAT	T	Physique Théorique.
QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmosphérique.	DIXMIER	T	Mathématiques (M.P.C.).
GALLIEN	T	Embryologie.	SOUCHAY	T	Chimie générale.
EICHORN	T	Botanique.	AIGRAIN	T	Electrotechnique générale.
DE CUGNAC	T	Biologie Vég. (S.P.C.N.).	BRUSSET	T	Chimie systématique.
M ^{lle} CAUCHOIS	T	Chimie Physique.	M. LÉVY	T	Physique théorique des Hautes Energies (Orsay).
THELLIER	T	Physique du globe.	M ^{me} CHAIX	T	Chimie biologique.
L'HÉRITIER	T	Biologie Générale (Orsay).	M ^{me} HUREL-PY	T	Biologie Végétale (P.C.B.).
GRIVET	T	Radioélectricité (Orsay).	PANNETIER	T	Chimie générale.
PONCIN	T	Mécanique Générale.	BRUN	T	Mécanique des Fluides I.
DUBREIL	T	Arithmétique et Théorie des Nombres.	LEDERER	T	Chimie biologique (Orsay).
QUELET	T	Chimie Organique.	M ^{me} DUBREIL	T	Mathém. (Agrégation).
CAGNIARD	T	Géophysique appliquée.	M ^{me} LELONG	T	Mathém. II (E.N.S.).
CHAMPETIER	T	Chimie macromoléculaire.	BELLAIR	T	Géologie (S. P. C. N.).
CUVILLIER	T	Micropaléontologie.	COTTE	T	Physique électricité.
JUNG	T	Géologie.	DUBOIS J. E.	T	Chimie organique.
TRILLAT	T	Microscopie et diffraction électronique.	LAMOTTE	T	Zoologie (E. N. S.).
WIEMANN	T	Chimie organique et structurale.	MICHEL A.	T	Chimie Minérale (Orsay).
JACQUINOT	T	Spectroscopie et physique céleste (Orsay).	OLMER	T	Energétique générale.
VASSY	T	Physique de l'atmosphère.	ROUAULT	T	Electricité (Orsay).
DESTOUCHES	T	Théories Physiques.	GAUTHIER	T	Mécanique appliquée.
AMIEL	T	Chimie générale.	BARCHEWITZ	T	Chimie Physique.
HOCART	T	Minéralogie et Cristallogr.	BROSSEL	T	Physique atomique.
J. P. MATHIEU	T	Physique Optique.	BUSER	T	Physiologie comparée.
COUTEAUX	T	Cytologie.	CAMUS	T	Physiol. Vég.
MAY	T	Zoologie.	CASTAING	T	Physique II Thermo. (Orsay).
CHOQUET	T	Théorie des fonctions et Topologie.	CURIEN	T	Minéralogie et Cristallographie.
FELDMANN	T	Biologie Végétale marine.	MOYSE	T	Physiologie végétale (Orsay).
GUINIER	T	Physique des Solides (Orsay).	M ^{me} CHARNIAUX-COTTON	T	Evolution des Etres Org.
JOST	T	Physiologie comparée.			

POSSOMPES	T	Zoologie.	SIESTRUNCK	T	Mécanique physique et expérimentale.
PULLMANN	T	Chimie quantique.	LACOMBE	T	Métallurgie des métaux nucléaires (Orsay).
TEILLAC	T	Physique Nucléaire et Radioactivité (Orsay).	BROCHARD	T	Physique P.C.B. (Orsay).
TONNELAT	T	Biologie physico-chim. (Orsay).	CABANNES	T	Mécanique générale.
VILLE	T	Econométrie.	LESIEUR	T	Math. I (Orsay).
WILLEMART	T	Chimie (P. C. B.).	MAZET	T	Mécanique générale (Orsay).
DODE	T	Chimie (Orsay).	CAIRE		Géographie physique et géologie dynamique.
FREYMANN	T	Recherches Physiques.	COMOLET		Mécanique des fluides.
GUINOCHET	T	Biologie Vég. S.P.C.N. (Orsay).	CORABOEUF	T	Physiologie animale (Orsay).
ROLLET	T	Chimie minérale.	DELLOUE	T	Physique de l'exosphère.
M ^{lle} JOSIEN	T	Chimie (S.P.C.N.).	GORENFLOT		Botanique II (Orsay).
CHEVALLEY	T	Géométrie algébrique et théorie des groupes.	HOUILLOIN		Biologie animale P.C.B.
ARNOULT	T	Electronique (Orsay).	JULLIEN J.		Chimie S.P.C.N. (Orsay).
CHAPELLE	T	Physique I (Orsay).	MALGRANGE	T	Technique mathématique de la physique (Orsay).
DELANGE	T	Mathématiques I (Orsay).	OLIVIER		Anthropologie.
DENY	T	Mathématiques Générales (Orsay).	NOZERAN	T	Botanique II (Orsay).
GERMAIN	T	Mécanique théorique des fluides.	BLANC-LAPIERRE ..	T	Physique E.N.S. (Orsay).
LUCAS	T	Géologie.	CHEVAUGEON	T	Botanique (Orsay).
ALLARD	T	Chimie Physique.	KAHANE	T	Mathématiques (Orsay)
BERTHELOT	T	Physique des particules fond. (Orsay).	SAMUEL	T	Mathématiques E.N.S. féminines.
BRICARD	T	Météorologie et phys. de l'Atmosphère.	KOURGANOFF	T	Astronomie (Orsay).
M ^{me} ALBE-FESSARD ..	T	Psychophysiologie.	THIRY	T	Mécanique céleste.
FRIEDEL	T	Physique des Solides (Orsay).	ABELES		Physique S.P.C.N.
M. JULIA	T	Etudes des Moléculaires complexes.	AMAT	T	Physique P.C.B.
LENDER	T	Biol. Animale S.P.C.N. (Orsay).	AUBOIN	T	Géologie.
MAGAT	T	Physico-chimie des radioéléments.	M ^{me} BENOIT-GUEU- TAL	T	Physique nucléaire et radioactivité (Orsay).
M ^{lle} QUINTIN	T	Electrochimie.	BOUGIS		Biologie marine Villefranche/Mer.
MONOD	T	Chimie du métabolisme.	BRUHAT	T	Mathématiques M.P.C.
BENOIT	T	Physiol. Anim. (Orsay).	BRUNN	T	Géologie historique (Orsay).
DE POSSEL	T	Analyse numérique.	CHABBAL	T	Physique M.G.P. (Orsay).
CHARLOT	T	Chimie analytique.	DEHEUVELS	T	Mathématiques propéd.
LEMÉE	T	Ecologie Vég. (Orsay).	DESAGNAT	T	Physique théorique (Orsay).
GUÉRIN	T	Chimie M. P. C. (Orsay).	FURON	T	Géologie S.P.C.N.
CHATELET	T	Chimie (P. C. B.).	M ^{me} GANS	T	Génétique.
JEAN	T	Phys. Nucléaire (Orsay).	GENEVES		Biologie végétale P.C.B.
MATTLER	T	Physique S.P.C.N.	GUILBERT		Physique C.U.S. (Orléans).
BERGERARD	T	Zoologie (Orsay).	HUPE	T	Pétrographie.
BERTIN	T	Electronique (Orsay).	HOLLANDE	T	Biologie générale.
BOUSSIÈRES	T	Radiochimie.	LIONS	T	Analyse numérique.
M ^{me} COUTURE	T	Thermodynamique et Mécanique Physique.	MAITTE	T	Chimie P.C.B.
ELLENBERGER	T	Géologie des grandes régions du globe (Orsay).	MEYER		Physique propédeutique.
FRANC	T	Biol. Animale (P. C. B.).	NICOLAS		Géologie appliquée.
SCHNELL		Botanique tropicale.	PANIGEL		Biologie générale.
STOLKOWSKI	T	Physiologie végétale.	RAVIER		Pétrographie.
ACHER	T	Chimie Biologique.	ROSEAU	T	Mécanique théorique des Fluides.
BAUDOIN	T	Biologie animale P.C.B.	ROUBINE		Electronique.
BEAUMONT		Biol. animale. S.P.C.N.	SILBER	T	Chimie P.C.B.
BLAMONT		Géophysique Ionosphère.	UEBERSFELD	T	Electronique.
BOUREAU	T	Botanique.	YVON	T	Théories physiques.
CURIE D.		Physique (M. G. P.).	HERVÉ	T	Mathématiques.
DURAND-DELGA	T	Géologie.	NERON	T	Mathématiques M.P.C. (Orsay).
FRÉON	T	Chimie organique (Orsay).	M ^{me} PECKERWIMEL ..	T	Astrophysique.
HELLER	T	Physiologie végétale.	BALKANSKY		Physique M.P.C.
TORTRAT	T	Calcul des Probabilités.	LE CORRE	T	Electricité.
CAILLEUX	T	Géologie (S. P. C. N.).	DELCROIX	T	Physique théorique (Orsay).
MAGNAN		Physique électricité.	GOURDIN		Physique théorique des hautes énergies (Orsay).
DAUDEL	T	Mécanique ondulatoire appliquée à la chimie théorique et à la Physique nucléaire.	LEHMANN	T	Physique exp. des hautes énergies.
M ^{lle} FOURCROY		Biol. Végétale (S.P.C.N.).	NATAF	T	Physique nucléaire et radioactivité (Orsay).
M ^{me} CHOQUET-BRUHAT ..		Mécanique analytique et Mécanique céleste.	ECHALIER		Biologie animale P.C.B.
M ^{lle} VEIL	T	Physiologie Générale.	BARRAUD		Physiologie cellulaire.
LWOFF	T	Microbiologie.	LIORÉ		Physiologie végétale (Orsay).
			DARS		Géologie structurale et géologie appliquée.
			CAMEFORT	T	Botanique (agrégation).

VICHNIEWSKY	T	Mécanique industrielle.	LEBERRE.....	Zoologie (Orsay).
BLAQUIERE		Electronique (Orsay).	SCHEFFER	Microbiologie (Orsay).
ARNOUS	T	Physique théorique.	DE GENNES	Physique des solides (Orsay).
TATIBOUET		Chimie (C.S.U. Orléans).		
MALLIAVIN	T	Mathématiques propédeutiques (Orsay).	RIOU	Physique nucléaire exp. (Orsay).
GAUDEMAR		Chimie propédeutique.	CLAUSER	Chimie biologique (Orsay).
PEREZ Y JORBA.....		Physique exp. des hautes énergies (Orsay).	CHEVALIER	Physiologie animale (Orsay).
DAVID	T	Chimie (aggrégation Orsay).	JANCOVICI.....	Physique atomique (Orsay).
BROUSSE	T	Mécanique théorique.	FALK-VAIRANT.....	Physique nucléaire (Orsay).
ROSCH	T	Astronomie.	FETIZON	Chimie propédeutique (Orsay).
GUY	T	Physique expérimentale.	CERF	Mathématiques (Orsay).
LAZARD		Mathématiques M.P.C.	LURCAT	Physique.
MOREL Pierre		Physique M.P.C.	RIGAUDY	Chimie S. P. C. N.
ARSAC		Programmation.	SIGWALT	Chimie S. P. C. N.
LEFEBVRE.....		Chimie M.P.C.	FOURNET	Electricité générale.
CHAPEVILLE		Biochimie.	COLLONGUES	Chimie C.P.E.N.
BENOIT		Physique C.P.E.M.	DUBERT	Biochimie.
RIO		Chimie C.P.E.M.	LAVOREL.....	Biologie physico-chimique.
JAUZEIN		Géologie E.N.S.	MOREL F.....	Physiologie comparée.
PREVOST G.....		B. V. C.P.E.M.	TALBOT	Génétique chimique.
FAVARD P.....		B. A. C.P.E.M.	M ^{me} NOUGAREDE.....	Botanique.
VILKAS		Chimie C.P.E.M.	FRANÇOIS	Zoologie.
M ^{lle} FIGINI		Chimie C.P.E.M.	IVANOFF	Océanographie physique.
LEQUEUX		Astronomie.	CADIOT	Chimie organique.
COHEN TANNODJI ..		Physique M.P.C.	BARUCH	Physique propédeutique.
TAVERNIER		Physique C.P.E.M.	NOZIÈRES	Physique générale.
M ^{me} ROIZEN.....		Physique C.P.E.M.	BOK	Physique propédeutique.
DURAND M.....		B. A. S.P.C.N.	SLONIMSKI	Génétique
PASCAUD		Physiologie.		
M ^{me} PETIT		B. A. C.P.E.M.		
BROUSSE		Géologie (Orsay).		
CAGNIAC		Physique (aggrégation Orsay).		

Le Secrétaire général.....R. POUILLAIN.

DÉTERMINATION DE LA LIMITE INFÉRIEURE DE COMPTAGE DANS UNE GRANULOMÉTRIE MICROSCOPIQUE

par Michel BENARIE

Institut National de Recherche Chimique Appliquée, Vert-le-Petit et Paris

1. Introduction. — Lorsqu'on s'intéresse à l'hygiène industrielle mais aussi à tout domaine de la science appliquée où l'on rencontre des aérosols, des poussières et des suspensions, on est amené à mesurer le « nombre total » des particules présentes dans un volume ou sur une surface donnée. Cette notion n'a de sens que si on définit les limites dimensionnelles inférieures et supérieures entre lesquelles on l'évalue, car tout ensemble de particules possède une courbe de distribution en dimensions.

Nous examinons dans ce mémoire le cas particulier du comptage microscopique. Si la limite supérieure est en général définie sans ambiguïté, il n'en est pas de même de la limite inférieure et ce sont les propriétés de celle-ci que nous avons cherché à mettre en évidence. Il ne faut d'ailleurs pas entendre cette limite au sens mathématique du terme mais plutôt comme un domaine où l'efficacité du comptage passe de 0 à 1.

Nous commencerons par définir de façon précise ce que représente une courbe d'efficacité de comptage. Ceci nous amènera à étudier théoriquement et expérimentalement les formes qu'elle peut revêtir. La variété des courbes expérimentales montre qu'elles sont fonctions d'un grand nombre de paramètres. Certains peuvent être définis par un nombre (exemple : l'ouverture numérique) mais d'autres qui ont pourtant une influence considérable (exemple : l'expérience de la personne effectuant le comptage) sont difficiles à chiffrer. La considération de la courbe d'efficacité (très voisine d'une loi gaussienne normale) permet de décrire les effets de ces nombreux facteurs uniquement avec deux paramètres.

Le présent exposé n'approfondit que les influences attribuables à l'appareillage et aux conditions d'observation, sans traiter en détail l'influence très importante, d'origine physiologique et psychologique, de l'observateur humain.

2. L'efficacité d'un dénombrement par classes. La fonction d'efficacité. — L'efficacité d'une opération est définie, pour un ensemble donné, par le rapport des nombres des éléments après et avant l'opération envisagée. S'il s'agit du comptage des particules d'une classe granulométrique étroite limitée par les diamètres D et $D + dD$, on parlera de l'efficacité du dénombrement sur cette classe. La granulométrie peut se rapporter soit au diamètre des objets réels, soit à leur image agrandie ou non par un instrument optique. Dans ce qui suit on envisagera

les images optiques formées par un microscope et vues par l'œil de l'observateur qui effectue le dénombrement directement ou sur un écran de projection. L'ensemble de départ est la totalité des grains limités aux diamètres D et $D + dD$ et réellement présents dans le champ examiné ; « l'opération » est la transformation de cet ensemble par la combinaison microscope-observateur. L'efficacité du dénombrement varie avec la classe granulométrique considérée. Pour chaque classe elle est exprimée par un nombre normalisé entre 0 et 1 ou 0 et 100 %. Cette série de nombres, fonction du diamètre D , constitue ce que nous appellerons la « fonction d'efficacité » $g(D)$.

$g(D)$ est une fonction de transfert, celle de la chaîne de comptage microscope + observateur. Le nombre de particules présentes est la grandeur d'entrée, le diamètre est la grandeur variable, le résultat du dénombrement est la grandeur de sortie. On conçoit intuitivement que pour des dimensions de particules nettement inférieures à la limite de résolution de l'instrument optique la valeur numérique de $g(D)$ puisse être choisie arbitrairement voisine de 0. Au contraire, si on travaille nettement au-dessus de la limite de résolution optique, on peut s'attendre à des valeurs de $g(D)$ proches de 1.

On admet souvent que

$$(1) \quad g(y_r - \varepsilon) = 0, \quad g(y_r + \varepsilon) = 1,$$

avec $y_r = 0,6 \lambda / (o.n.)$, y_r étant le rayon de la tache de diffraction du microscope à la longueur d'onde λ , o. n. l'ouverture numérique et ε une longueur très petite. Or, y_r défini par la formule ci-dessus n'est pas la limite de résolution, mais le rayon de la tache de diffraction. La limite de résolution est une fonction complexe des propriétés du récepteur, faisant intervenir tous les facteurs physiques et physiologiques modifiant la réponse du récepteur. La valeur de cette fonction au niveau du pouvoir séparateur est en général un nombre choisi plus ou moins arbitrairement, qui représente une probabilité de détection (par exemple 50 % ou 80 % de détections [1]). Ainsi $g(y_r) = 0,5$ ou $g(y_r) = 0,8$, etc.

La théorie de la diffraction permet également de calculer le contraste image d'un objet défini [2] (par exemple un point parfaitement noir [2] p. 64) examiné avec un éclairage bien défini. Ainsi le contraste γ d'un point noir en éclairage cohérent est

$$(2) \quad \gamma = 2 s \omega / \lambda^2,$$

où ω est l'angle solide du cône des rayons formant l'image et s l'aire de l'image géométrique de l'objet. A l'aide de la théorie de la diffraction, on peut aussi calculer la répartition des éclairagements dans le plan image, toujours à condition que l'éclairage et le contraste de l'objet soient parfaitement définis.

Dans les cas réels, tels celui du dénombrement microscopique des poussières, le contraste-objet est difficile à mesurer, l'observation se fait à l'aide d'un instrument dont les aberrations, la lumière parasite, voire la cohérence même de l'éclairage sont loin d'être parfaitement connus. Il faut donc recourir à la mesure expérimentale des grandeurs définies par les expressions (1) et (2). Ainsi, Charman [3] a déterminé la répartition des éclairagements dans le plan image pour des objets (particules de latex) de diamètre 0,26 à 2,79 μ . En outre, dans le cas particulier du dénombrement microscopique des grains de poussière, les objets considérés ne se situent pas dans un seul plan ; l'opérateur procède par mises au point successives

et la définition théorique ou expérimentale du diamètre apparent et du contraste-image d'un objet unique situé au milieu du champ n'est que d'un intérêt académique.

Enfin la théorie de la diffraction nous donne la limite angulaire et le contraste minimum au-dessous desquels on ne perçoit plus un objet. On prévoit ainsi le nombre total de particules que l'on pourra compter dans un champ ; le résultat expérimental en est souvent éloigné. C'est ici qu'intervient la notion d'efficacité de comptage qui précise le pourcentage des particules réellement présentes sur la préparation que l'on peut pratiquement compter.

3. Le nombre total. — Le « nombre total », c'est-à-dire le résultat d'un dénombrement microscopique fait pour toutes les classes granulométriques, est donné par l'intégrale

$$(3) \quad \int_0^{\infty} F(D) g(D) dD = S,$$

où $F(D)$ est la fonction représentant le spectre granulométrique réel.

La pratique des comptages montre que ce « nombre total » obtenu sur une préparation unique varie entre de très larges limites (à titre d'exemple de 1 à 20) suivant les conditions dans lesquelles le dénombrement est effectué. En conséquence, la fonction d'efficacité du dénombrement microscopique dépend d'un certain nombre de facteurs expérimentaux dont voici une liste non limitative :

en ce qui concerne le microscope,

le mode d'éclairage (fond noir, fond clair),

le type du condenseur, son ouverture numérique,

le type et l'ouverture numérique de l'objectif,

le grossissement,

l'état d'entretien et de propreté des surfaces optiques, la lumière parasite ;
en ce qui concerne les conditions d'observation,

la différence des indices de réfraction de la substance observée et du milieu environnant,

la mise au point de l'instrument,

le mode d'observation (vision directe, contraste de phase, projection),

l'éclairage de la pièce où on fait la microscopie ;

pour l'observateur,

son acuité visuelle,

son adaptation à l'éclairage ambiant,

son attention et l'intérêt porté au travail,

son entraînement aux travaux de comptage.

4. Définition de la « limite de visibilité conventionnelle ». — L'efficacité du dénombrement est une fonction empirique. Dans certains cas, le travail expérimental en vue de sa détermination n'est pas justifié, voire même impossible. On définit alors une « limite de visibilité conventionnelle » : c'est le diamètre à partir duquel le nombre total de particules de la granulométrie réelle est égal au comptage obtenu par la méthode en question. La « limite de visibilité conventionnelle » est donc la limite inférieure de l'intégration de la fonction de répartition granulo-

métrique réelle qui donne un chiffre égal à celui trouvé par le dénombrement microscopique expérimental.

Sa définition mathématique y est

$$(4) \quad \int_0^{\infty} F(D) g(D) dD = \int_y^{\infty} F(D) dD = S.$$

Cette expression, qui montre que y est fonction de $F(D)$ et de $g(D)$, n'a de sens que si $F(D)$ est une fonction continue.

5. Plan des expériences. — Les notions pratiques de fonction d'efficacité et de limite de visibilité conventionnelle nécessitent des méthodes permettant de les mesurer.

A) On peut théoriquement prévoir la forme de la fonction d'efficacité (§ 6).

B) Sur une population de particules dont le nombre réel et la fonction de répartition sont connus par une détermination de préférence non optique, on peut effectuer une granulométrie par la méthode (microscopique) qu'on veut utiliser. Pour chaque classe délimitée par D et $D + dD$ on obtiendra le point de la courbe représentant la fonction d'efficacité correspondant à l'abscisse $D + \frac{1}{2} dD$.

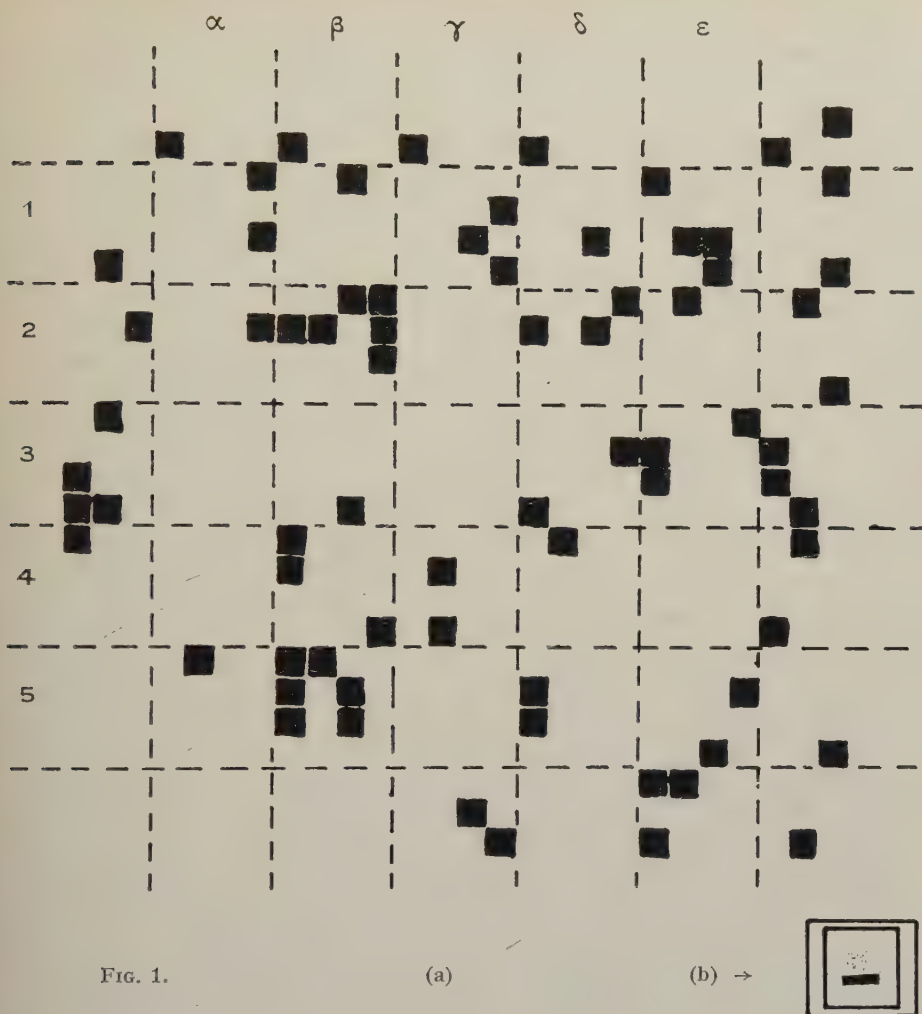
Des populations de particules de nombre et granulométrie connus ont été réalisées dans les conditions suivantes :

a) avec des latex monodispersés on a une faible différence d'indice de réfraction avec le milieu environnant (suspension aqueuse) et un faible contraste ; le contrôle des dimensions se fait principalement par la microscopie électronique, le résultat est confirmé par d'autres méthodes (coefficient de diffusion) ;

b) avec un étalon de comptage on obtient un contraste important ; le contrôle des dimensions se fait par microscopie sur un grossissement physique non optique (cf. § 7.2A) dont la description détaillée sera donnée plus loin. L'étalon représente un cas où la différence des indices de réfraction est élevée.

C) En connaissant la fonction de distribution granulométrique réelle $F(D)$ et la courbe d'efficacité $g(D)$ d'une méthode définie on peut calculer, d'après l'équation (4), la limite de visibilité y . D'autre part, en effectuant un dénombrement par la même méthode sur la fonction de distribution $F(D)$, on a un nombre total S ; on obtient y à partir de ce total. La comparaison des limites de visibilité conventionnelles obtenues par ces deux procédés est l'objet du paragraphe 8.

6. Théorie de l'efficacité de comptage. — L'image visuelle d'une particule dont la taille est voisine de la limite de résolution de l'instrument optique utilisé est, par définition, proche d'un seuil visuel : seuil de contraste ou seuil de discrimination angulaire [4]. On sait, à la suite des mesures de Blackwell [5], que la fréquence des réponses correctes à la présentation d'un stimulus visuel pas trop éloigné du seuil de contraste ou de discrimination angulaire est très exactement représentée par une courbe de Gauss. Le « seuil » est défini par la valeur du stimulus correctement identifié dans 50 % des cas. Alors que la perception d'une particule dont l'image se situe à la limite de visibilité est quantitativement représentée par une courbe normale, on peut se demander pourquoi des particules nettement inférieures à la limite de visibilité sont comptées avec une probabilité non négligeable comme le prouvent les résultats expérimentaux.



Supposons que la fraction q d'un élément de surface carré dont le côté est A soit occupé par n particules élémentaires identiques (symbole p), chacune des particules p étant plus petite que la limite de résolution, donc individuellement invisible. La lumière transmise à travers l'élément de surface A^2 peut être suffisamment atténuée (par exemple, par le facteur $q < 1$) pour que l'élément de surface donne l'impression d'une particule visible et qui sera comptée (symbole P).

Soit m le nombre moyen de particules p par élément de surface et une distribution de Poisson de ces particules. Si le côté des objets p (qu'on suppose, pour simplifier l'exposé, carrés et non superposables) est égal à a , on aura

$$(5) \quad n a^2 = q A^2.$$

Les éléments de surface contenant au moins n particules seront comptés comme

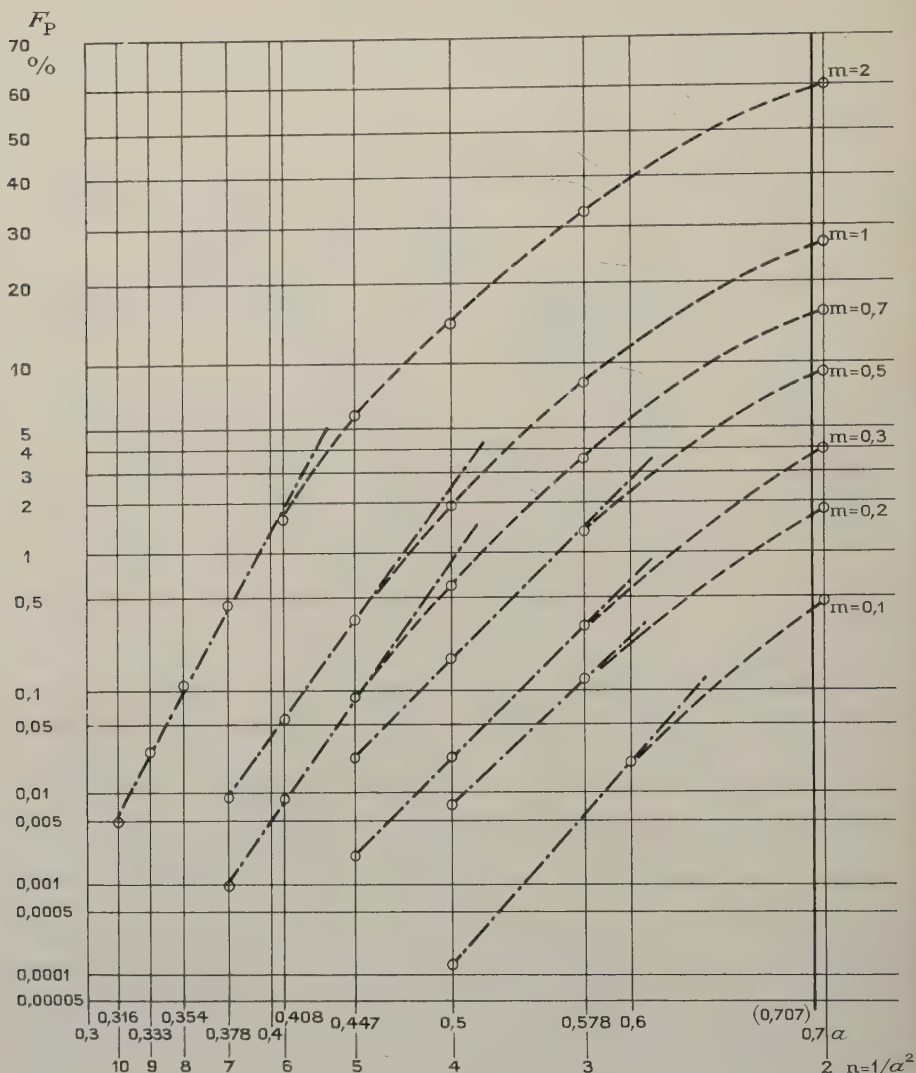


FIG. 2.

un P et leur proportion sera

$$(6) \quad F_P = e^{-m} \sum_{v=0}^{\infty} \frac{m^v}{v!}.$$

La figure 1a montre ces relations. Les rectangles en tirets ont un côté égal à A et contiennent en moyenne deux « particules » (c'est-à-dire $m = 2$), de façon que $4a = A$. L'emplacement des « particules » a été établi à l'aide d'un tableau de chiffres au hasard. La figure 1b contient une réduction photographique de 40 du dessin de la figure 1a. Si on la regarde à 40 ou 50 cm de distance dans un endroit moyennement éclairé, les éléments individuels sont au-dessous de la limite de résolution de la vision normale. On distingue cependant, en fonction de la distance,

de l'éclairement, etc., trois à quatre taches visibles, dont deux situées certainement en $\beta 2$ et $\beta 5$, une autre vers $\epsilon 1$, etc. On constate donc que 4 à 5 éléments p sur une surface de $16 a^2$ créent l'impression d'un élément P dans les conditions d'observation mentionnées ; q est environ égal à 0,3.

De l'expression (6) il résulte qu'avec $m = 2$ et $v = 4$, 14,3 % des champs A^2 contiennent 4 éléments p ou plus, ce qui correspond assez bien à l'observation.

La figure 2 représente F_P en fonction de a avec m comme paramètre ; l'échelle des abscisses étant arbitraire, on fixe $a = n^{-1/2}$.

Dans le domaine des faibles valeurs de m qui sont les seules pratiquement intéressantes, on constate sur la figure 2 que les points F_P , quoique non alignés sur une droite dans un réseau gaussien, s'en écartent assez peu. On ne peut pas parler des courbes représentant les F_P , car la distribution de Poisson n'a de sens que pour des valeurs entières de n. Les lignes courbes reliant les valeurs de F_P appartenant au même m sont donc dépourvues de sens mathématique et ne sont à considérer que comme des aides visuels pour lire le diagramme. On peut donc penser qu'avec plusieurs suspensions monodispersées dont les particules p ont les diamètres $a_1, a_2, \dots, a_n$, étalées sur un porte-objet de façon à avoir m particules par élément de surface (qu'on imaginera par exemple comme un carré de côté égal à la limite de résolution) le comptage de particules P occasionné par la coïncidence de 2, 3, ..., n particules, sera représenté par une fonction qui, avec la précision empirique qu'on peut obtenir dans de telles expériences, se confondra avec une loi gaussienne normale.

La probabilité de compter une particule P est donnée par le produit de la probabilité F_P qu'un tel groupement de deux, trois ou plusieurs particules existe et de la probabilité d'apercevoir ce stimulus proche du seuil visuel. La première de ces probabilités F_P , pouvant être considérée comme une approximation de la loi gaussienne et la deuxième obéissant également avec une bonne précision expérimentale à la loi normale, on a à effectuer la multiplication des ordonnées de deux fonctions gaussiennes.

On a donc, pour la probabilité F_P qu'un groupement perceptible de particules existe,

$$(7) \quad F_P = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_e} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_e^2} (D - D_e)^2 \right]$$

et, pour la probabilité A_P d'apercevoir un tel groupement,

$$(8) \quad A_P = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_a} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_a^2} (D - D_a)^2 \right].$$

$\sigma_e, D_e, \sigma_a, D_a$ sont respectivement les paramètres définissant la distribution des probabilités d'existence et de perception. On cherche la probabilité $F_P A_P$:

$$(9) \quad F_P A_P = \frac{1}{2\pi \sigma_e \sigma_a} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(D - D_e)^2}{\sigma_e^2} + \frac{(D - D_a)^2}{\sigma_a^2} \right] \right\}.$$

Si les conditions

$$(10) \quad 2\pi \sigma_e \sigma_a = \sqrt{2\pi} \sigma$$

et

$$(11) \quad \frac{(D - D_e)^2}{\sigma_e^2} + \frac{(D - D_a)^2}{\sigma_a^2} = \frac{(D - D_m)^2}{\sigma^2}$$

peuvent être simultanément satisfaites. $F_P A_P$ obéit également à la loi normale. En résolvant les équations (10) et (11) on a

$$(12) \quad \sigma = \sqrt{2\pi} \sigma_e \sigma_a,$$

$$(13) \quad D_m = D - \sqrt{2\pi} \sqrt{(D - D_e)^2 \sigma_a^2 + (D - D_a)^2 \sigma_e^2},$$

c'est-à-dire que la fonction d'efficacité du dénombrement des particules peut toujours être exprimée par une gaussienne dont les paramètres sont D_m et σ .

Si ce raisonnement théorique est confirmé par l'expérience les conséquences en sont très importantes : la multitude des conditions expérimentales énumérées au paragraphe 3, dont un certain nombre ne se laissent pas chiffrer avec précision, pourront s'exprimer dans leur ensemble à l'aide de deux nombres facilement accessibles à l'expérience.

7. 1. *Etablissement de courbes d'efficacité de comptage sur des particules de latex.* — A) MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL. — La Dow Chemical Co a mis au point une série de particules de latex de résine de polystyrène de monodispersion remarquable. Ce n'est pas un produit commercialisé, mais mis gracieusement à la disposition de certains laboratoires. Je tiens à remercier ici M^r L. J. Lippie d'avoir bien voulu m'en faire parvenir la quantité nécessaire aux expériences qui seront décrites ci-après.

L'aspect de ces particules est illustré par la figure 3. Les particules apparaissent comme parfaitement sphériques. Leur dimension et leur monodispersion sont caractérisées (tableau I) par des mesures faites sur les négatifs originaux du microscope électronique. (L'agrandissement sur papier photographique peut introduire une erreur de 1 à 3 % en raison des changements dimensionnels du papier.) Ces particules se trouvent en suspension dans un milieu liquide, généralement de l'eau pure, contenant environ 1 % du poids du polymère en substance tensioactive.

TABLEAU I

Nombre des particules mesurées	577	373	85	142
Diamètre moyen	0,264	0,557	0,796	1,305
Ecart-type	0,006 0	0,010 8	0,008 3	0,015 8

L'indice de réfraction du corps en suspension, mesuré par la méthode des liquides d'immersion sur une portion de latex desséché, est de 1,59.

Dans le cas d'une suspension dans l'eau pure, la différence d'indice de réfraction Δn de la substance examinée par rapport au milieu ambiant est de 0,26.

a) Des échantillons convenables pour le comptage ont été préparés, en diluant une goutte d'environ 30 mg de la suspension (pesée à 0,01 mg près) dans 100 cm³ d'eau. Le nombre de particules par centimètre cube a été déterminé de deux façons différentes :

a) on l'a calculé à partir de la teneur en substance solide (polystyrène) du latex. Dans ce but un échantillon pesé est évaporé à sec dans un dessiccateur à vide ; le solide résiduel est repesé. Etant donné la forme très exactement sphérique des particules et l'absence d'autres substances non volatiles, on obtient le nombre réel de particules par centimètre cube à $\pm 7\%$ près ;

b) dans le cas des particules de 0,796 μ et 1,305 μ , leur concentration a été



44 300 ×



44 300 ×



44 300 ×



31 100 ×

FIG. 3. — Microphotographies électroniques des particules de latex.

contrôlée au compteur Coulter [6]. Cette méthode détermine le nombre et la dimension de particules en suspension dans un liquide électriquement conducteur qui circule à travers une petite ouverture possédant de chaque côté une électrode immergée. La concentration est telle que les particules traversent l'ouverture une par une ; chaque passage y déplaçant l'électrolyte, ceci fait varier la résistance entre les électrodes et produit une impulsion de tension d'amplitude proportionnelle au volume de la particule. La série des signaux résultants est amplifiée, mesurée et comptée. Pour les particules inférieures à environ $0,6 \mu$, les indications du compteur Coulter deviennent incertaines. En principe, le compteur Coulter mesure également le diamètre des particules mais on n'en fait pas état, car les latex monodispersés servent justement à l'étalonnage absolu en diamètre de l'appareil. Par contre, le *nombre* de particules, traduit en impulsions électriques, est indépendant de tout étalonnage. Ce nombre réel par centimètre cube est donné par le tableau II.

TABLEAU II

Diamètre des particules en microns	0,264	0,557	0,796	1,305
Nombre de particules				
à partir de la teneur en solides	$1,2 \times 10^9$	$4,3 \times 10^8$	$1,3 \times 10^8$	$2,9 \times 10^7$
par le Coulter	non déterminé		$1,18 \times 10^8$	$2,65 \times 10^7$
par centimètre cube				

Les chiffres de la deuxième ligne du tableau II, calculés à partir de la teneur en solides, peuvent être affectés d'une erreur de $\pm 7 \%$, car la pesée de la fraction solide se fait à $\pm 1 \%$ près et le diamètre des particules (voir tableau I) est connu à 2% près.

b) Le nombre de particules de latex a été déterminé, pour chaque échantillon, dans une cellule classique de comptage par microscopie optique. Cette cellule est une cuve circulaire de 10 mm de diamètre et d'exactly 0,4 mm d'épaisseur ; chaque nombre est la moyenne de cinq comptages sur cinq champs.

Les particules sont animées de mouvement brownien. D'une part, c'est un avantage car leur distribution au hasard et leur état de désagglomération dans le champ visuel sont assurés. D'autre part, c'est une difficulté pratique pour le comptage, l'image des particules changeant continuellement en netteté, d'où une importante source d'erreur.

Un point expérimental important doit être précisé si on veut compter des particules d'un diamètre défini ; il faut d'abord s'assurer de l'absence d'agglomérats. Pour que les déductions théoriques du paragraphe 6 soient valables, il faut que la distribution des particules de latex dans le champ visuel se fasse au hasard. D'autre part, si au lieu de particules isolées on a affaire à des groupes, la mesure soigneuse des diamètres devient illusoire, car ce qu'on aperçoit ce ne sont plus les particules, mais les agglomérats.

L'absence d'agglomération est prouvée par :

a) la coïncidence satisfaisante entre les nombres des particules par centimètre cube déterminés par les deux méthodes ;

b) les suspensions diluées de latex de $0,557 \mu$, $0,796 \mu$ et $1,305 \mu$ ont été examinées en utilisant un objectif d'immersion, d'ouverture numérique 1,25 et de

grossissement 1 200 fois. Ces conditions permettent d'observer la forme des particules et de distinguer les éléments unitaires et les agglomérats. Par l'examen de milliers de particules de chaque catégorie on a constaté qu'il y avait moins de 2 % de doublets et pas de triplets. Cet examen a été répété, avec un résultat identique, après stockage des suspensions diluées pendant un mois à la température ambiante ;

c) on a observé l'intensité de la lumière diffusée (Tyndall) des quatre suspensions diluées. Après six mois de conservation à la température ambiante, on a constaté la même diffusion et aucun dépôt, c'est-à-dire qu'en six mois il n'y avait pas eu d'agglomération appréciable. La durée d'un comptage étant inférieure à 1 h, on n'a pas donc à craindre un changement de l'état de la suspension pendant l'expérience.

B) CONDITIONS EXPÉRIMENTALES ; RÉSULTATS. — Parmi les conditions expérimentales, énumérées au paragraphe 3, qui influencent les résultats des dénombrements, on choisit d'étudier celles qui concernent le microscope. Dans le présent paragraphe on ne traite pas les facteurs concernant l'observateur, facteurs qui, selon l'expérience pratique, paraissent avoir la plus grande influence. Les courbes qui suivent sont valables uniquement pour l'observateur qui les a établies.

Ces facteurs envisagés sont :

TABLEAU III

Objectif	Ouverture numérique				
Contraste de phase, observation directe					
Leitz Pv Apo 40	0,70	oculaire	12,5 ×	12,5 ×	10 ×
		fact. de tube	1,25 ×	1,00 ×	1,00 ×
Leitz Pv 20	0,48	oculaire		20 ×	20 ×
		fact. de tube		1,25 ×	1,00 ×
Grossissement total			625 ×	500 ×	400 ×
Fond clair, observation directe					
Nachet 60	0,85	oculaire	10 ×	8 ×	6 ×
		fact. de tube	1,00 ×	1,00 ×	1,00 ×
Nachet 25	0,55	oculaire	20 ×	20 ×	12,5 ×
		fact. de tube	1,25 ×	1,00 ×	1,25 ×
Grossissement total			625 × 500 ×	500 × 480 ×	390 × 360 ×
Fond clair, projection sur écran					
Nachet 25	0,55	grossissement	600 ×	500 ×	350 ×
			en variant la distance de l'écran		

TABLEAU IV. — Résultats des comptages de latex monodispersés avec o. n. et éclairages différents

Diamètre des particules (μ)			0,264		0,557		0,796		1,305							
Nombre moyen de particules par cm^3 (v. tableau II)			$1,2 \times 10^9$		$4,3 \times 10^8$		$1,3 \times 10^8$		$1,9 \times 10^7$							
	volume exa- miné	objectif o. n.	grossis- sment	particules		particules		particules		particules						
				com- p- tées	par cm^3 en %	com- p- tées	par cm^3 en %	com- p- tées	par cm^3 en %	com- p- tées	par cm^3 en %					
Contraste de phase, observation directe	100×235 235μ	Leitz 40	0,70	625 $\times$	55	$1,0 \times 10^7$	8 ± 1	556	$1,0 \times 10^8$	22 ± 1	303	$5,5 \times 10^7$	$42 \pm 2,5$	140	$2,55 \times 10^7$	$88 \pm 7,5$
				500 $\times$	39	7×10^6	6 ± 1	489	9×10^7	20 ± 1	254	$4,5 \times 10^7$	35 ± 2	138	$2,50 \times 10^7$	$86 \pm 7,5$
				400 $\times$	28	5×10^6	4 ± 1	458	8×10^7	18 ± 1	276	$5,0 \times 10^7$	$40 \pm 2,5$	138	$2,50 \times 10^7$	$86 \pm 7,5$
Contraste de phase, observation directe	100×235 235μ	Leitz 20	0,48	500 $\times$	5	1×10^6	$1 \pm 0,5$	110	$2,0 \times 10^7$	$5 \pm 0,5$	137	$2,5 \times 10^7$	20 ± 2	116	$2,10 \times 10^7$	72 ± 7
				400 $\times$	5	1×10^6	$1 \pm 0,5$	112	$2,0 \times 10^7$	$5 \pm 0,5$	127	$2,3 \times 10^7$	18 ± 2	113	$2,05 \times 10^7$	70 ± 7
				600 $\times$	7	3×10^6	$2,5 \pm 1$	161	$7,2 \times 10^7$	15 ± 1	97	$4,2 \times 10^7$	32 ± 3	55	$2,5 \times 10^7$	$85 \pm 11,5$
Fond clair, observation directe	100×150 150μ	Nachet 60	0,85	480 $\times$	4	2×10^6	2 ± 1	115	$5,1 \times 10^7$	12 ± 1	92	$4,0 \times 10^7$	30 ± 3	54	$2,4 \times 10^7$	83 ± 12
				360 $\times$	4	2×10^6	2 ± 1	118	$5,2 \times 10^7$	10 ± 1	92	$4,0 \times 10^7$	30 ± 3	51	$2,3 \times 10^7$	80 ± 11
				625 $\times$	0		0	23	8×10^6	$1,5 \pm 0,3$	45	$1,3 \times 10^7$	$10 \pm 1,5$	67	$1,9 \times 10^7$	66 ± 8
Fond clair, observation directe	100×187 187μ	Nachet 25	0,55	500 $\times$	0		0	23	8×10^6	$1,5 \pm 0,3$	35	$1,0 \times 10^7$	$8 \pm 1,5$	63	$1,8 \times 10^7$	62 ± 8
				390 $\times$	0		0	14	5×10^6	$1 \pm 0,3$	35	$1,0 \times 10^7$	$8 \pm 1,5$	61	$1,75 \times 10^7$	60 ± 8
				600 $\times$	0		0	3	1×10^6	$0,2 \pm 0,1$	14	4×10^6	3 ± 1	40	$1,15 \times 10^7$	$40 \pm 6,5$
Fond clair, projection	100×187 187μ	Nachet 25	0,55	500 $\times$	0		0	3	1×10^6	$0,2 \pm 0,1$	11	3×10^6	2 ± 1	40	$1,15 \times 10^7$	$40 \pm 6,5$
				350 $\times$	0		0	1	5×10^5	$0,1 \pm 0,1$	7	2×10^6	$1,5 \pm 0,5$	32	9×10^6	30 ± 5

Les doubles traits délimitent l'écart-type inférieur à 15 %.

a) la méthode d'éclairage et la méthode d'observation :

contraste de phase, observation directe,

éclairage fond clair, observation directe,

éclairage fond clair, observation par projection ;

b) l'ouverture numérique et le type de l'objectif 600, 500 et 400 fois (environ), selon les possibilités des combinaisons optiques.

On a relevé quatre points de la courbe d'efficacité du dénombrement correspondant aux latex définis par le tableau II pour les conditions optiques décrites par le tableau III. Ces résultats sont présentés par le tableau IV et permettent, dans le paragraphe suivant, l'analyse des courbes d'efficacité du dénombrement. Les considérations théoriques (§ 6) montrent que les courbes établies avec une suspension de particules dépendent aussi de la concentration des particules ; les valeurs du tableau IV correspondent aux concentrations indiquées par le tableau II. Une conclusion importante est la bonne représentation des dénombrements sur les latex par une courbe gaussienne ce qui confirme les prévisions théoriques.

C) INFLUENCE DU GROSSISSEMENT. — Les figures 4 à 8 représentent chacune un cas où le grossissement est variable tandis que les autres paramètres (conditions d'éclairage et d'observation, ouverture numérique) sont fixes.

Le tableau IV met en évidence un gain d'efficacité entre les grossissements 500 et 600 ; ce gain paraît douteux entre les grossissements 400 et 500. Les figures 4 à 8 montrent que l'influence du grossissement dépasse à peine l'erreur expérimentale.

On ne peut pas faire varier le grossissement entre de plus larges limites sans toucher à l'ouverture numérique de l'objectif.

D) INFLUENCE DE L'OUVERTURE NUMÉRIQUE. — La figure 9 présente l'information contenue dans le tableau IV en fonction de l'ouverture numérique, les conditions d'observation et le grossissement étant fixés.

L'ouverture numérique a une influence beaucoup plus importante sur l'allure des courbes d'efficacité que le grossissement.

E) INFLUENCE DES CONDITIONS D'ÉCLAIRAGE ET D'OBSERVATION. — Finalement, on peut déduire du tableau IV des courbes d'efficacité pour lesquelles l'ouverture numérique d'environ 0,5 et le grossissement d'environ 500 sont constants ou au moins varient peu et cela pour les trois conditions fondamentales d'éclairage et de mode d'observation (fig. 10).

On constate que les courbes d'efficacité sont modifiées de façon très appréciable par les conditions d'éclairage et d'observation.

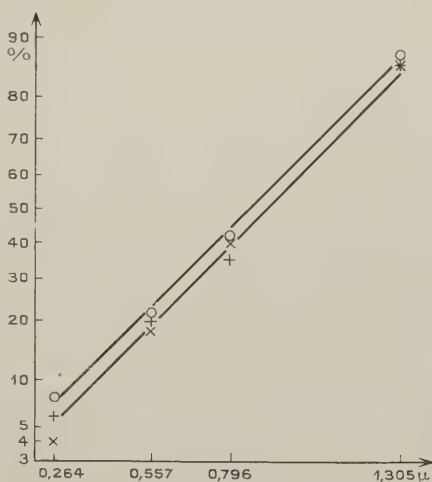


FIG. 4. — Efficacités de comptage à grossissement variable : 625 × (o), 500 × (x), 400 × (+) ; Leitz 40/0,70, contraste de phase, observation directe.

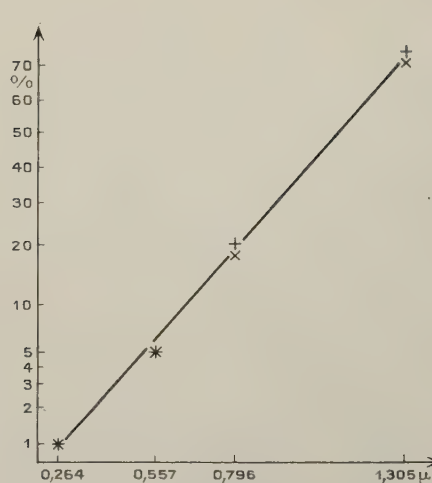


FIG. 5. $500\times$ (+), $400\times$ (x); Leitz 20/0,48, contraste de phase, observation directe.

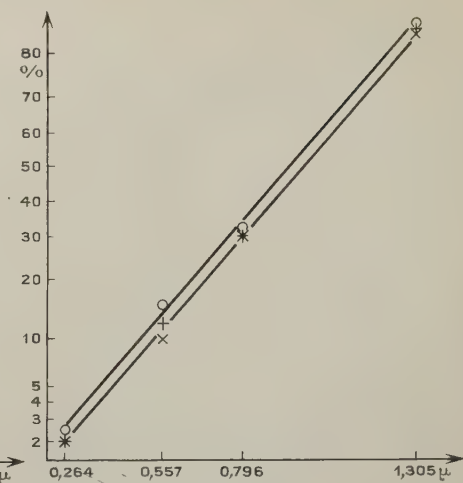


FIG. 6. $600\times$ (o), $480\times$ (+), $360\times$ (x); Nachet 60/0,85, fond clair, observation directe.

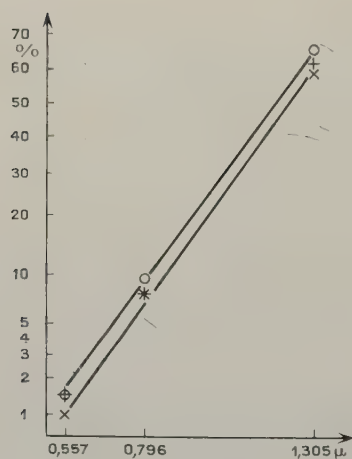


FIG. 7. $625\times$ (o), $500\times$ (+), $390\times$ (x); Nachet 25/0,55, fond clair, observation directe.

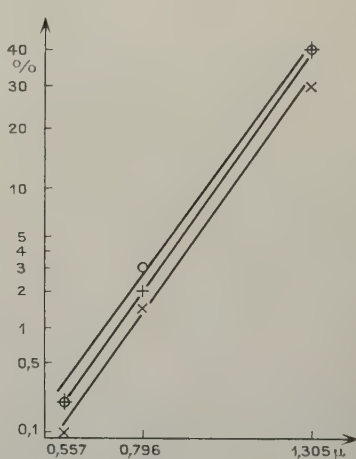


FIG. 8. $600\times$ (o), $500\times$ (+), $350\times$ (x), Nachet 25/0,55, fond clair, projection.

2. *Courbes d'efficacité dans le cas d'un contraste élevé et d'une forte différence d'indice de réfraction ; l'étalon de limite de visibilité.* — L'étalon de limite de visibilité est une population de « particules » réalisée artificiellement dans le but d'avoir une fonction de répartition connue. Il a été conçu pour mesurer une « limite de visibilité » [7] qui est en fait la limite de visibilité conventionnelle précédemment définie.

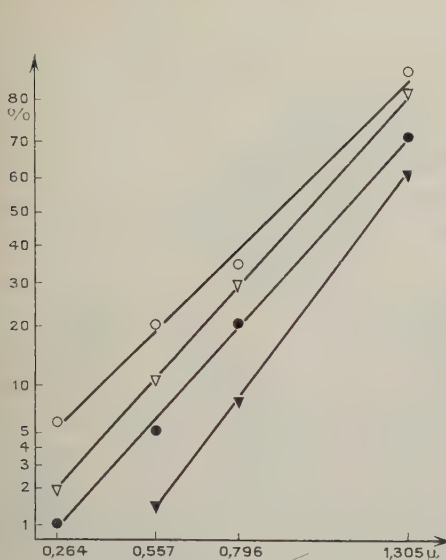


FIG. 9. — Leitz, contraste de phase, observation directe, $500\times$: o. n. 0,70 (o), o. n. 0,48 (●) ; Nacet, fond clair, observation directe, environ $500\times$: o. n. 0,85 (▽), o. n. 0,55 (▼).

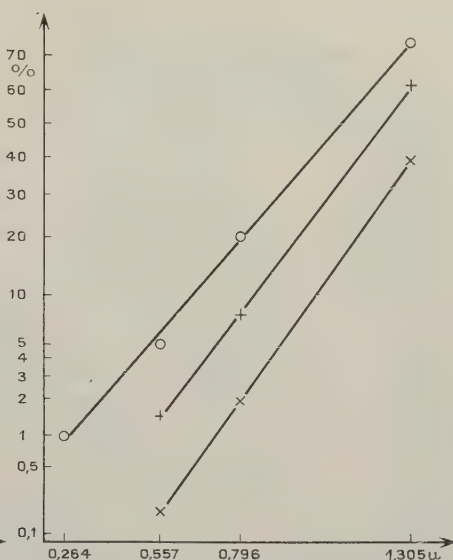


FIG. 10. — Leitz, contraste de phase, o. n. 0,48 (o) ; Nacet, fond clair, observation directe, o. n. 0,55 (+) ; Nacet, fond clair, projection, o. n. 0,55 (x).

A) CONSTRUCTION DE L'ÉTALON. — On s'efforce de réaliser une population de « pseudo-particules » dont la fonction de répartition soit contrôlée sans recours aux méthodes optiques. Un test dont les dimensions et la distribution sont imprévisibles par l'observateur est à préférer à un test composé d'un réseau périodique et régulier. En conséquence, l'idée initiale était de réaliser un faisceau de fils de diamètre compris entre 0,1 et 10 μ , chaque classe de diamètre étant représentée par un certain nombre (connu) de fils. D'un tel faisceau, enrobé dans une matière plastique convenable, on pourrait découper au microtome des tranches identiques entre elles, le diamètre exact des fils pouvant être établi par exemple par la pesée d'une longueur importante. Cette technique, très séduisante, n'est pas praticable à cause du manque de fils, soit métalliques, soit de hauts polymères suffisamment fins.

On a alors adopté le mode opératoire suivant. Un certain nombre de tubes de verre (au maximum une trentaine) de diamètre extérieur compris entre 1 et 3 mm et d'épaisseur de paroi comprise entre 0,25 et 0,5 mm sont introduits dans un tube de verre d'environ 5 à 6 mm de diamètre intérieur. Ce faisceau est étiré dans un petit four électrique en capillaires multiples dont le diamètre extérieur est de 0,2 à 0,5 mm.

Le four électrique est constitué de quinze spirales de bande de nichrome de $2 \times 0,5$ mm, le diamètre intérieur du cylindre ainsi formé étant de 8 à 9 mm. On introduit, dans le four vertical, le tube de verre à étirer maintenu par une pince. La partie supérieure du faisceau est recourbée en un petit crochet auquel on



FIG. 11.

attache un fil qui, après passage sur une poulie, est maintenu en tension par un poids de 200 à 500 g. Par chauffage de la résistance, le verre se ramollit et s'étire d'une façon contrôlable sous l'action du poids. Un certain nombre — de nouveau une trentaine — de capillaires multiples sont introduits dans un tube de verre d'environ 3 mm de diamètre intérieur (6 à 7 mm de diamètre extérieur). Ce faisceau, contenant maintenant environ 30×30 capillaires, est étiré dans le four décrit plus haut, en un capillaire de 0,2 mm de diamètre extérieur.

Par cette méthode, il est facile de réaliser des faisceaux avec des capillaires très uniformes. Dans notre cas, le but au contraire était de réaliser un faisceau ayant des trous de diamètres et de formes très différents. On y arrive en réunissant, dans

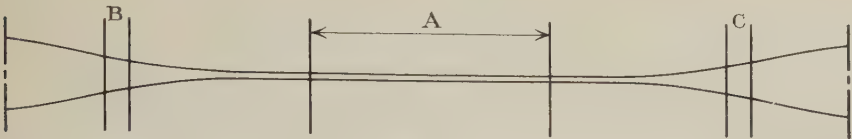


FIG. 12.

un premier stade du travail, des capillaires de diamètres aussi différents que possible et en chauffant, lors du second étirage, un peu plus fort. La figure 11 est la microphotographie de la branche B (fig. 12) du tube obtenu. Le tube de verre étiré présente, comme on le voit sur la figure 12, une partie A plus ou moins cylindrique et deux bouts B et C à peu près coniques. Les parties B et C sont prélevées à l'aide d'un couteau à verre et microphotographiées. Si l'on constate — et c'est ce qui arrive dans la plupart des cas — que les sections de B et de C sont strictement homothétiques, on découpe la partie cylindrique A en autant de tranches de 6 à 8 mm de longueur que le permet l'étirage ; ces tranches après montage serviront comme étalon de comptage. On vérifie d'abord, dans chaque tranche, la présence de grosses lacunes (équivalent à de grosses particules) reconnaissables à leur forme et à leur disposition. On constate ainsi que la partie la plus étirée A est l'homothétique des tranches B et C. Ces dernières représentent un grossissement physique (non optique) de la partie A. En examinant les microphotographies de ces tranches agrandies, on n'a pas complètement respecté le critère imposé plus haut, c'est-à-dire l'indépendance de toute observation optique. Pourtant, l'étape décisive du grossissement par laquelle des « particules » inférieures à la longueur d'onde de la lumière passent dans le domaine certainement observable, même avec des objectifs microscopiques médiocres, est franchie par une méthode autre qu'optique.

TABLEAU V. — Granulométrie de l'étalon

Limite des diamètres en microns	Nombre de « particules »	Nombre de par- ticules de diamètre inférieur au dia- mètre limite	
		—	—
< 0,35	105	18,5 %	105
0,35-0,4	31	24	136
0,4 -0,5	68	36	204
0,5 -0,6	67	48	271
0,6 -0,7	57	58	328
0,7 -0,8	45	66	373
0,8 -0,9	39	73	412
0,9 -1,0	29	78	441
1,0 -1,15	28	83	469
1,15-1,35	39	90	508
1,35-1,65	23	94	531
1,65-2,0	11	96	542
2,0 -2,5	9	97,5	551
2,5 -3,0	4	98,2	555
3,0 -4,0	3	98,8	558
4,0 -5,0	2	99,2	560
5,0 -7,0	2	99,7	562

Total : 565 « particules »

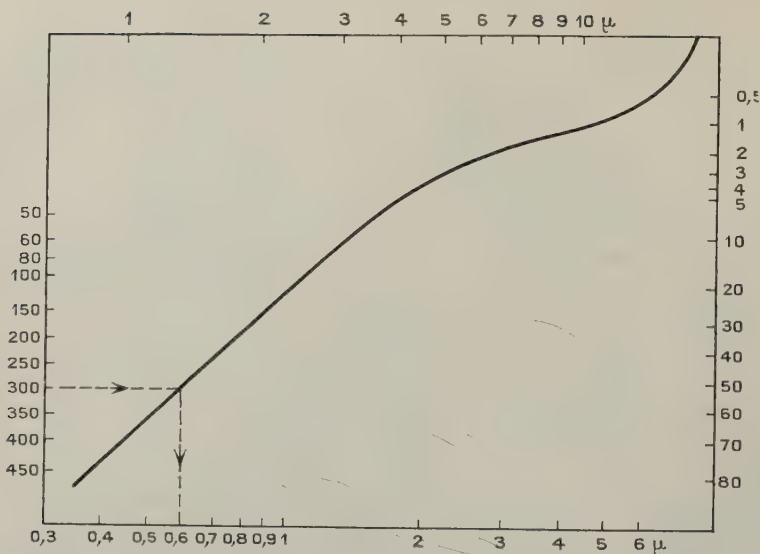


FIG. 13. — En abscisses : en bas, diamètre sur l'étalon ; en haut, diamètre sur « l'agrandissement physique ». En ordonnées : à gauche, nombre de « particules » vues sur l'étalon ; à droite, proportion en pour cent (sur 565 « particules ») des « particules » ayant un diamètre plus grand que celui indiqué par l'abscisse inférieure.

Les parties B et C étant découpées, on les a microphotographiées et la « granulométrie » a été établie (tableau V) au compteur optique semi-automatique Zeiss-Endter TGZ 3 [8].

La « granulométrie » de l'étalon est présentée graphiquement sur la figure 13.

La valeur numérique du grossissement physique est obtenue par la mesure microscopique des diamètres extérieurs des tranches respectives. Puisqu'il s'agit de centaines de microns, cela peut se faire avec une précision satisfaisante. Les morceaux découpés dans la partie cylindrique sont introduits dans un trou ménagé dans une pièce en laiton ; comme protection on colle sur le trou un couvre-objet microscopique (fig. 14).

En éclairage incohérent (condenseur à grande ouverture numérique), le verre des différents faisceaux formant l'étalon sert de conduit de lumière et est fortement éclairé, tandis que les tubes remplis d'air apparaissent complètement noirs. On a mesuré le contraste de l'image avec un photomètre de Pulfrich jouant le rôle d'oculaire d'un système microscopique. Le contraste de l'image est de 0,9 ; c'est celui qu'on trouve en examinant une lame de rasoir que l'on dispose sur un porte-objet de façon à obtenir deux demi-champs, l'un éclairé et l'autre sombre. Puisque les contrastes d'image sont égaux et que le contraste-objet de la lame de rasoir est égal à 1, on peut admettre que le contraste-objet du test est entre 0,9 et 1.

En schématisant le faisceau de capillaires comme dans la figure 15, on a $\frac{B}{b} = \frac{B \operatorname{tg} \alpha}{a} \simeq \frac{B \sin \alpha}{a}$ pour les réflexions dans l'air et $\frac{B}{b_1} \simeq \frac{B \sin \alpha}{n a}$ pour les réflexions dans le verre.

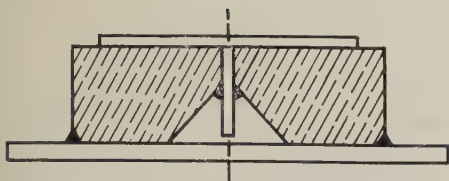


FIG. 14.

Dans le présent cas, $B/a = 10^3$, $\sin \alpha \simeq 1/4$ et $n \simeq 1,5$; on a 250 réflexions dans l'air contre 180 dans le verre. En admettant 5 % de perte par réflexion, le contraste air-verre devient $(0,95^{180} - 0,95^{250})/0,95^{180} \simeq 0,97$.

B) COURBES D'EFFICACITÉ DU DÉNOMBREMENT ÉTABLIES AVEC L'ÉTALON. — Avec la combinaison optique indiquée au bas du tableau VI, une microphotographie agrandie 3 500 fois a été confectionnée. Le microscope utilisé était un

Ultraphot de Zeiss. Au cours de l'agrandissement photographique (à l'aide d'un objectif d'agrandissement Leitz Elmar de 50 mm), des précautions spéciales ont été prises afin que le grain de la plaque n'introduise pas une perte de définition prohibitive surtout en ce qui concerne le négatif obtenu avec les objectifs $10\times$, o. n. 0,25 et o. n. 0,10, où un agrandissement photographique de dix fois devenait nécessaire. Le diamètre du cercle de diffusion de l'objectif Elmar étant de $30\ \mu$ environ et celui de l'image de la plus petite particule, d'ailleurs pratiquement absente à cause du pouvoir de résolution faible de l'objectif microscopique, dépassant $100\ \mu$ sur le négatif, l'erreur due à cette cause est comparable à celle de la méthode de mesure des diamètres sur l'agrandissement photographique final. Pour tous les autres objectifs microscopiques et dimensions de particules, l'erreur due à la perte de définition (objectif photographique, grain de la plaque) au delà de l'objectif du microscope est négligeable. Les agrandissements photographiques, tirés sur papier spécial, sont de nouveau évalués au compteur optique semi-automatique Zeiss-Endter TGZ 3.

Les résultats de ces dénombrements avec quatre combinaisons optiques sont indiqués en nombres sur le tableau VI; les mêmes résultats représentés graphiquement forment la figure 16. La granulométrie sur microphotographie ne transforme pas l'évaluation en une opération entièrement objective. Même avec le compteur Zeiss-Endter, les décisions du manipulateur, en fonction de ses facultés et caractéristiques physiologiques et optiques, jouent un rôle important. Si la photographie était évaluée d'une façon complètement objective (par exemple, par microdensitométrie) la courbe d'efficacité se transformerait en une fonction échelle [équation (1)] imposée par la théorie de la diffraction. On constate à partir de la figure 16 que pour une faible ouverture numérique la fonction d'efficacité tend bien vers une fonction échelle.

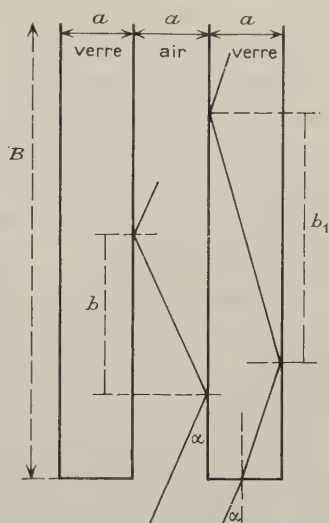


FIG. 15.

TABLEAU VI. — Résultats des comptages de l'étalon avec des ouvertures numériques différentes

1	2	3	4	5	6	
Limites de diamètres en μ	Nombre réel de « par- ticules » (col. 2, tab. V)		Objectif Nachtet 60 $\times$ o. n. 0,90	Objectif Nachtet 25 $\times$ o. n. 0,55	Objectif Zeiss 10 $\times$ o. n. 0,25	Objectif Zeiss- Winkel 10 $\times$, dia- phragmé 0,10
0,35-0,70	306	particules comptées	189	60	6	0
		en % 306 = 100 %	62	20	2	0
0,70-0,85	83	particules comptées	67	45	10	0
		en % 83 = 100 %	81	54	12	0
0,85-1,00	52	particules comptées	49	40	24	1
		en % 52 = 100 %	94	76	46	2
1,00-1,15	44	particules comptées	43	40	30	6
		en % 44 = 100 %	97,5	90	68	14
1,15-1,35	27	particules comptées	29	28	25	10
		en % 27 = 100 %	≈ 100	≈ 100	92	37
1,35-1,65	23	particules comptées	21	24	22	18
		en % 23 = 100 %	≈ 100	≈ 100	≈ 100	78
> 1,65	30	particules comptées	32	29	30	35
Total	565		430	266	147	70
Oculaire photo. Zeiss-Winkel			4 $\times$	12 $\times$	12 $\times$	12 $\times$
Grossissement sur le négatif			650 $\times$	650 $\times$	350 $\times$	350 $\times$

8. Comparaison des limites de visibilité conventionnelles directement déterminées et calculées à partir d'une courbe d'efficacité déterminée sur l'étalon. — Parmi les deux catégories de populations, des latex monodispersés et l'étalon, dont des courbes d'efficacité ont été déterminées au cours de ce travail, c'est l'étalon qui permet la mesure de la limite de visibilité conventionnelle. L'équation (4) qui définit cette notion, appliquée à une fonction d'impulsion $F(D)$ telle que

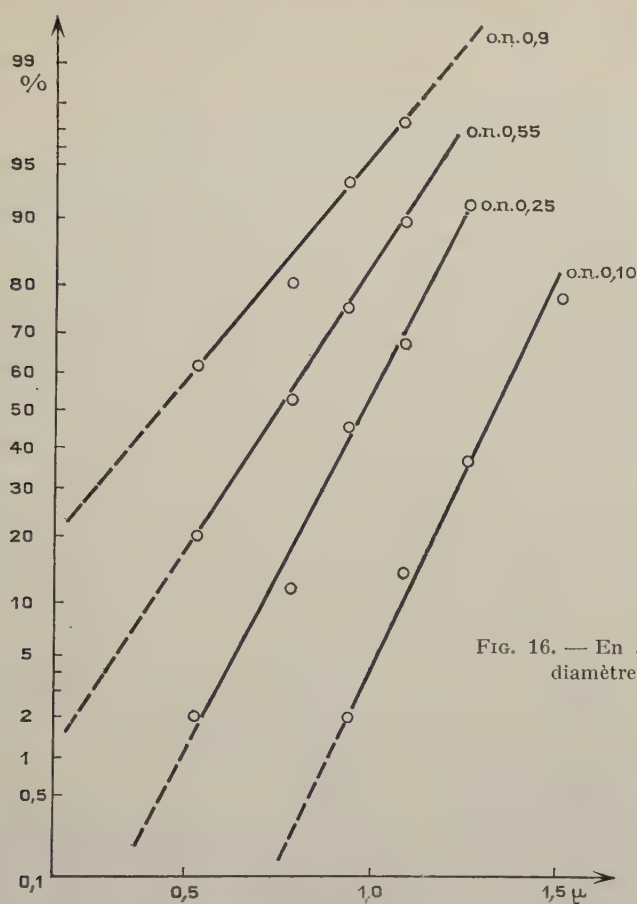


FIG. 16. — En abscisse, diamètre.

$F(D_m) = 1$, $F(D \neq D_m) = 0$ représentant une population monodispersée, dégénère en la fonction d'efficacité $g(D_m)$.

Remarquons qu'au cours du paragraphe 7.2 on a déterminé $F(D)$ et $g(D)$, ce qui permet de mesurer la limite de visibilité conventionnelle soit par dénombrement direct (§ 8.1), soit par application de l'équation (4) [§ 8.2].

1. Mesure de la limite de visibilité conventionnelle avec l'étalon. — L'étalon a été conçu à l'origine comme moyen rapide de mesure de la limite de visibilité conventionnelle d'un système microscope + observateur, dans les conditions mêmes du travail pratique (état du microscope, réglage, etc.). Pour cela, l'opérateur compte le nombre total de particules « visibles ». Par convention, ce ne sont que les particules intérieures des faisceaux qui sont comptées ; les espaces obscurs délimités par trois, quatre ou plusieurs faisceaux ne sont pas pris en considération. Les espaces non comptés sont désignés comme tels dans la figure 11 ; ils sont au nombre de 15. Toute autre convention pourra être également adoptée sans rien changer au principe. Le nombre trouvé est S de l'équation (4) ; il suffit donc d'entrer sur l'ordonnée correspondant au nombre S dans la granulométrie

TABLEAU VII

Objectif	O. n.	Grossissement	Eclairage et mode d'observation	Observateur	Moyenne trouvée	Limite de visibilité trouvée	Limite de visibilité calculée à partir de la courbe d'efficacité	Limite de visibilité par la formule d'interpolation (14)
Nacht 60 ×	0,90	650 ×	obs. directe	BA	395	0,45 μ	0,47 μ	0,46 μ
Leitz Apo 40 ×	0,70	500 ×	obs. directe	S	366	0,50		0,55
		500 ×		G	335	0,55		
		500 ×		M	266	0,66		
		750 ×		M	295	0,61		
Nacht 20 ×	0,65	400 ×	projection	G	292	0,62		0,57
Nacht 25 ×	0,55	400 ×	projection	D	260	0,66	0,72	0,63
		400 ×		BR	266	0,68		
		650 ×		BA	255	0,67		
		500 ×		G	209	0,75		
Zeiss Apo 1 10 ×	0,30	500 ×	obs. directe	G	203	0,80		0,85
Zeiss Apo 2 10 ×	0,30	500 ×	obs. directe	G	129	1,0		0,85
Leitz Summar 16 mm	0,2	500 ×	obs. directe	G	165	0,87	0,88	1,0
Zeiss 10 ×	0,25	350 ×	obs. directe	BA	132	1,0		0,92
Zeiss Epi 5,7 ×	0,17	285 ×	obs. directe	G	130	1,0		1,0 ₅
Zeiss 6 ×	0,15	300 ×	obs. directe	G	67	1,3	1,3	1,2
Zeiss-Winkel	0,10	350 ×	projection	BA				

cumulative (fig. 13) et l'abscisse correspondante définie par la relation (4) est y . Dans la figure 13 on a illustré par des flèches l'exemple de 300 « particules » dénombrées, ce qui donne $y = 0,6 \mu$.

Bien entendu, on peut faire la même opération sur toute population dont la fonction de répartition granulométrique réelle est connue avec assez de précision. Parmi les possibilités envisagées (par exemple, le dénombrement microscopique des échantillons de poussières atmosphériques réelles, dont la granulométrie est établie par la microscopie électronique [9, 10], l'étalon proposé, invariable et rapide pour l'utilisation pratique, permet, par exemple, de contrôler l'état d'entretien d'un microscope, les progrès par acquisition d'expérience ou les régressions par perte d'acuité visuelle d'un certain opérateur dans la technique du comptage.

Par la méthode décrite dans ce paragraphe, on a établi la limite de visibilité conventionnelle d'un certain nombre de combinaisons microscope + observateur, en faisant compter par chaque opérateur, en moyenne trois fois, trois étalons en principe identiques. Divers systèmes microscopiques ont pu être ainsi examinés (tableau VII).

Les chiffres de la dernière colonne ont été calculés par la formule empirique [7]

$$(14) \quad y = \lambda / [0,4 + (o. n.)],$$

avec $\lambda = 0,6 \mu$, o. n. étant l'ouverture numérique de l'objectif.

La première conclusion qu'on peut déduire du tableau VII en s'aidant de l'expression (14) est que dans le cas de l'étalon, c'est-à-dire pour un contraste et une différence d'indice de réfraction élevés, on peut très bien exprimer la limite de visibilité conventionnelle avec un seul paramètre : l'ouverture numérique.

Deuxièmement, la méthode d'observation n'a pas la même importance que dans le cas d'une faible différence d'indice de réfraction ; les dénombrements sur les sixième, septième, huitième, neuvième et seizième lignes du tableau VII obéissent également à la formule empirique (14), sans former un groupe distinct de celui des dénombrements faits en observation directe.

Troisièmement, l'influence du grossissement — entre les limites de 1 à 1,5 — n'est pas significative : entre les quatrième et cinquième lignes d'une part et les huitième et neuvième lignes d'autre part on ne constate pas de différences notables.

Finalement, les lignes 2 à 5 indiquent que l'expérience de l'opérateur a une certaine influence sur la limite de visibilité ; S et G sont des personnes qui s'occupent journellement de comptage, tandis que M, à qui on a expliqué la technique opératoire avant l'expérience, ne possède pas d'entraînement spécial dans ce domaine.

2. Calcul des limites de visibilité à partir des courbes d'efficacité. — Pour quatre objectifs (lignes 1, 9, 12 et 16 du tableau VII) on a déterminé les courbes d'efficacité (fig. 16). D'autre part, on dispose de la fonction de distribution réelle $F(D)$ [tableau V et fig. 13] de la population. D'après le premier membre de l'équation (4) on peut calculer très facilement S , ce qui permet (§ 8.1) de retrouver la limite de visibilité, en se reportant de nouveau à la figure 13.

La méthode de calcul très simple est illustrée par l'exemple suivant (tableau VIII) : en entrant sur l'ordonnée de gauche à 242 particules dans la courbe granulométrique cumulative (fig. 13) on trouve en abscisse $0,72 \mu$ (avant-

dernière colonne du tableau VII), en accord satisfaisant avec la limite $\gamma = 0,67$ qu'on a obtenue par observation directe. Pour les objectifs Nachet 60/0,90, Zeiss 10/0,25 et Zeiss-Winkel/0,10 les résultats concordent encore mieux.

TABLEAU VIII. — Calcul de la limite de visibilité de l'objectif Nachet 25 $\times$, o. n. 0,55

1 Diamètre en microns (relevés sur tableau V)	2 Nombre des parti- cules par intervalle	3 Efficacité de comptage en pour cent (d'après fig. 16)	Particules dénombrées (produit des colonnes 2 et 3)
0,35	105	2	2
0,35-0,4	31	8	3
0,4 -0,5	68	13	9
0,5 -0,6	67	23	15
0,6 -0,7	57	36	21
0,7 -0,8	45	52	23
0,8 -0,9	39	67	26
0,9 -1,0	29	80	23
1,0 -1,15	28	89	25
1,15-1,35	39	97,5	38
1,36-1,65	23	99,9	23
1,65-7,0	34	100	34

Total : 242 particules

9. **Conclusions.** — La notion de courbe d'efficacité de comptage a été définie et théoriquement étudiée. Des courbes expérimentales d'efficacité sont données pour deux cas essentiellement différents :

- contraste-objet fort, proche de 1 ;
- contraste-objet faible.

Dans le cas du contraste fort, représenté par l'étalon, le facteur décisif est l'ouverture numérique de l'objectif du microscope. Ni le grossissement, ni les conditions concernant l'observation ne sont prépondérants, comme on le voit par le tableau VII. Les conditions d'éclairage ne sont pas des variables dans les observations faites avec l'étalon, car elles sont complètement définies. Dans le cas de contraste faible (latex), le grossissement ne joue pas non plus un rôle important. L'ouverture numérique, les conditions d'éclairage et d'observation créent des divergences sérieuses. Le facteur décisif qui modifie les courbes d'efficacité est vraisemblablement, d'après des essais dont on ne fait pas état dans le présent travail, l'observateur : son entraînement aux travaux de comptage, son attention et l'intérêt porté à son travail, son adaptation à l'éclairage ambiant ainsi que son acuité visuelle.

Le caractère important des courbes d'efficacité de dénombrement, démontré par la théorie ainsi que par les expériences faites, est qu'elles appartiennent, d'une manière générale, à la famille des lois de normales de probabilité. On peut ainsi résumer numériquement par deux paramètres la totalité des facteurs de variation, même lorsque ceux-ci ne peuvent pas être étudiés individuellement serait-ce au prix d'un effort expérimental important. Alors que la forme des courbes d'efficacité est connue, la valeur numérique des deux paramètres de ces courbes n'est valable dans le cas des faibles contrastes, que pour la personne (dans le cas présent l'auteur)

qui les a établies. Elles caractérisent une combinaison conditions d'observation + observateur bien définie et unique.

Elle peuvent servir :

a) à confirmer l'identité, à constater une différence survenue dans le temps ou entre deux combinaisons conditions d'observation + observateur ;

b) à transformer (par un raisonnement et un calcul identiques à ceux exposés dans le paragraphe 8.2) le nombre total de particules trouvé avec une certaine combinaison conditions d'observation + observateur dont on connaît la courbe d'efficacité en nombre total qu'on a obtenu ou qu'on pourrait obtenir par une autre combinaison conditions d'observation + observateur dont la courbe d'efficacité doit être alors également connue. Ceci est plus rigoureux dans le cas du fort contraste, car les courbes d'efficacité n'accusent pas de variations numériques importantes en fonction de l'observateur. On a même constaté, dans ces conditions, que tout observateur bien entraîné possède, dans la limite des erreurs expérimentales, la même courbe d'efficacité ; le dénombrement caractérise les conditions d'observation. C'est pour cette raison que l'étalon convient bien pour la vérification de l'état de bon entretien, etc., des microscopes. D'autre part, le fait que le contraste et une différence d'indice de réfraction élevée tendent à éliminer les différences personnelles, ce qui est d'ailleurs bien connu des praticiens, impose d'adopter, dans le cas de dénombrements pratiques de poussières, un contraste et une différence d'indice aussi élevés que possible.

La définition de la limite de visibilité conventionnelle découle de la fonction d'efficacité de comptage. Appliquée à une granulométrie bien définie (dont l'étalon est un exemple) elle permet de voir immédiatement si l'ensemble des facteurs agissant sur la courbe d'efficacité de comptage est resté identique à lui-même d'une expérience à l'autre, sans qu'il soit nécessaire pour autant de connaître les valeurs numériques de cette courbe d'efficacité.

M^r le Professeur J. Bricard a conduit, a organisé et a surveillé ce travail avec intérêt et il m'a aidé de ses encouragements. Je le prie d'accepter mes remerciements.

Je remercie M^r le Professeur A. Arnulf qui m'a fait l'honneur de présider le Jury ainsi que M^r le Professeur Y. Le Grand qui a bien voulu faire partie du Jury chargé de juger ce travail.

Ces recherches ont été effectuées au Laboratoire des Aérosols de l'Institut National de Recherche Chimique Appliquée, au Bouchet, sous la direction de M^r l'Ingénieur Général A. P. Avy, que je remercie pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Enfin, je remercie l'Institut National de Recherche Chimique Appliquée et spécialement son Directeur Général, M^r l'Ingénieur Général J. Chedin, qui m'a autorisé à publier ce travail et je tiens à exprimer ma gratitude à tous mes collègues et au personnel du Laboratoire des Aérosols de l'Institut National de Recherche Chimique Appliquée qui m'ont apporté un concours désintéressé et plus particulièrement à M^r l'Ingénieur en Chef J. Ponroy et à M^r J. C. Guichard pour leur précieuse et amicale collaboration.

Manuscrit reçu le 5 juillet 1965.

RÉFÉRENCES

- [1] M. FRANÇON & M^{me} M. ROUSSEAU, Microscopie, micromesures, *apud* Techniques de l'ingénieur, Paris, 1961, R 3 420.
 - [2] A. MARÉCHAL & M. FRANÇON, Diffraction et structure des images, éd. *Rev. Opt.*, Paris, 1960.
 - [3] W. N. CHARMAN, *Jl Royal micr. Soc.*, t. **82**, 1964, p. 163.
 - [4] C. FABRY & A. ARNULF, Vision dans les instruments, éd. *Rev. Opt.*, Paris, 1937.
 - [5] H. R. BLACKWELL, *Jl opt. Soc. Amer.*, t. **36**, 1946, p. 624.
 - [6] J. KUBITSCHKEK, *Research*, t. **13**, 1960, p. 129.
 - [7] M. BENARIE, *Rev. Poll. atm.*, t. **6**, 1964, p. 32.
 - [8] F. ENDTER & H. GEBAUER, *Optik*, t. **13**, 1956, p. 97.
 - [9] W. H. WALTON & W. J. HARRIS, Porton technical paper n° 1, 1947.
 - [10] F. WAINWRIGHT & W. H. WALTON, National Coal Board, Central Res. Est^t Report n° 122, 1951.
-

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Résistance d'un milieu gazeux au mouvement de particules d'aérosols

Vu et approuvé :

Paris, le 27 Janvier 1966

Le Doyen de la Faculté des Sciences

Marc ZAMANSKY

Vu et Permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

Jean ROCHE

